

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 - Strojírenství

Materiály a technologie

zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

VLIV VELIKOSTI OTVORU NA MEZNÍ DEFORMACI PŘI ZKOUŠCE ROZŠÍŘOVÁNÍ OTVORU

THE EFFECT OF HOLE SIZE ON THE LIMIT DEFORMATION USING HOLE EXPANSION TEST

Lukáš Najman

KSP - TP - B

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	45
Počet tabulek:	3
Počet obrázků:	36
Počet grafů:	3

Datum: 24. 5. 2013



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Lukáš N A J M A N
Studijní program	B2341 Strojírenství
Studijní obor	3911R018 Materiály a technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářské práce na téma:

Vliv velikosti otvoru na mezní deformaci při zkoušce rozšiřování otvoru

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Základní charakteristika hlubokotažných materiálů a druhy ochranných povlaků.
2. Základní technologické zkoušky tváritelnosti ocelových plechů.
3. Seznámení se s principy bezkontaktního měření deformace tvářených plechů.
4. Experimentální zjištění vlivu velikosti otvoru na mezní stav deformace při zkoušce rozšiřování otvoru.
5. Vyhodnocení výsledků měření.
6. Závěr.





Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva: v rozsahu cca 30 stran

- přílohy: grafy, tabulky

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] PETRUŽELKA, J.: *Úvod do tváření I.*, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava 2001, ISBN 80-7078-877-1.
- [2] MACHEK, V. VESELÝ, L. VESELÝ, M. VIŠŇÁK, J.: *Zpracování tenkých plechů*, SNTL Praha, 1983.
- [3] POHLANDT, K.: *Materials Testing for the Metal Forming Industry*, Springer-Verlag Berlin, 1989.
- [4] BOLJANOVIC, V.: *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*, New York 2004, ISBN 0-8311-3182-9.
- [5] ASM HANDBOOK 14B.: *Sheet metal forming*, ASM INTERNATIONAL 2004, ISBN-13:978-0-87170-710-9.
- [6] DAVIS, J.R.: et al. *ASM Metals Handbook, Vol. 14, Forming and Forging*. 9. vydání, [s.l.], ASM International 1988, 978 s. ISBN 0871700204.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry



doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 15. 2. 2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. (v uvedeném lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 - Strojírenství

Student: Lukáš Najman

Téma práce: Vliv velikosti otvoru na mezní deformaci při zkoušce
rozšiřování otvoru
The effect of hole size on the limit deformation using hole
expansion test

Číslo BP: KSP - TP - B

Vedoucí BP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant BP: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D

Klíčová slova: mezní deformace, hlubokotažný plech, metoda Siebel Pomp,
systém Aramis

Abstrakt: Má obrobený otvor ve vzorku vliv na mezní deformaci a gradient deformace pro hlubokotažný plech? Šetření probíhalo metodou Siebela Pompa a optickým 3D měřicím systémem Aramis. Těmito způsoby vyhodnocení bylo zjištěno, že průměr otvoru na mezní deformaci vliv nemá. Avšak gradient deformace je velikostí obrobeného otvoru ovlivněn.

Abstract: Does a machine hole in the sample influence a marginal deformation and a gradient of the deformation for deep-drawing sheet? Research has been done by Siebel Pomp's method and 3D optical measurements, called Aramis. According to this methods, it has been discovered that the diameter of the hole does not influence the marginal deformation. However, the gradient of the deformation is affected by the size of the machine hole.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. 5. 2013

.....
Lukáš Najman
Gagarinova 776/41
460 07 Liberec 6



Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a pomoc při vedení bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za ochotu a pomoc při získání potřebných informací pro vypracování bakalářské práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval paní Ing. Michaelle Kolnerové, Ph.D. za pomoc s úpravou formální podoby mé bakalářské práce. Velké díky také patří mé rodině a přátelům za podporu při tvorbě bakalářské práce.



Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	7
1. Úvod	9
2. Teoretická část	10
2.1. Materiály pro tváření a ochranné povlaky.....	10
2.1.1. Druhy tváření a materiály	10
2.1.1.1. Válcování plechů	11
2.1.1.2. Hlubokotažné plechy.....	12
2.2.1. Povrchové úpravy	12
2.2.1.1. Důvod a použití povrchových úprav	12
2.2.1.3. Povrchová úprava Zn+Mg	13
2.2. Technologické zkoušky.....	15
2.2.1. Seznámení s technologickými zkouškami	15
2.2.2. Mechanické zkoušky	15
2.2.2.1. Rozdělení mechanických zkoušek	16
2.2.2.2. Defektoskopie	19
2.2.3. Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa	20
2.3. Zaznamenávání měření.....	22
2.3.1. Fotogrammetrie	22
2.3.2. Systém ARAMIS	22
3. Experimentální část.....	25
3.1 Měření hlubokotažných plechů	26
3.1.1. Příprava vzorků	26
3.1.2. Průběh měření	27
3.1.3. Vyhodnocení vzorků podle Siebela a Pompa	30
3.1.4. Vyhodnocení vzorků pomocí softwaru Aramis	32
4. Shrnutí výsledků a zhodnocení vlivu průměru otvoru na deformaci v materiálu.....	39
5. Závěr.....	41
6. Seznam použité literatury	42
Seznam obrázků	44



Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Název	Jednotky
R	vrubová houževnatost	J.cm ⁻²
d _{max}	maximální rozšíření otvoru	mm
d _{min}	minimální rozšíření otvoru	mm
d ₀	průměr předstříženého otvoru	mm
q	míra vhodnosti plechu k hlubokému tažení dle Siebela a Pompa	(-)
t ₀	tloušťka plechu	mm
Ød ₁ , Ød ₂ , Ød ₃	naměřené průměry díry	mm
Ød ₀	střední hodnota průměru díry	mm
ØD	střední hodnota průměru rozšířeného otvoru jedné sady vzorků	mm
ØD'	střední hodnota průměru rozšířeného otvoru jednoho vzorku	mm
ØD _{1,...,ØD₅}	naměřené hodnoty průměrů rozšířených otvorů	mm
φ	hlavní deformace	(-)
x	vzdálenost od hrany otvoru	mm
s	směrodatná odchylka	(-)
MT	jakost materiálu vhodná k mírnému tažení	-
ST	jakost materiálu vhodná ke střednímu tažení	-
HT	jakost materiálu vhodná k hlubokému tažení	-
VT	jakost materiálu vhodná k velmi hl. tažení	-
DQ	tažné plechy	-
DDQ	hlubokotažné plechy	-
EDDQ	zvlášť hlubokotažné plechy	-
EDDQ-S	super hlubokotažné plechy	-
IF ocel	(interstitials free) ocel bez intersticií	-
TiCN	karbid titanu	-
NbCN	karbid niobu	-
PVD	(Physical Vapor Deposition) metoda nanášení kovů při povlakování	-
Zn	zinek	-
Mg	hořčík	-
σ	napětí normálové	MPa
τ	napětí tečné	-
F	síla	N
M	moment	N/m
ε	poměrné prodloužení	(-)
Δl	změna délky	mm
3D	trojrozměrné zobrazení	-



Symbol	Název	Jednotky
R_e	mez kluzu v tahu	MPa
R_{et}	mez kluzu v tlaku	MPa
R_m	pevnost v tahu	MPa
U	mez úměrnosti	MPa
E	mez elasticity	MPa
K	mez kluzu	MPa
P	mez pevnosti	MPa
S	místo přetržení tyčinky	-
h	výška kyvadla	mm
h'	překývnutí kyvadla	mm
u_1, u_2	úhlopříčky vtisku	mm
F_1, F_0	zatěžující síly	N
HBS, HBW	zkouška podle Brinella	-
HRD, HRE, HRF, HRG, HRH, HKH	zkouška podle Rockwella	-
DX56D ZM90 BO	označení materiálu	-



1. Úvod

Cílem bakalářské práce je zjistit, zda má průměr otvoru vliv na velikost vzniklé deformace při rozšiřování otvoru, a jak se hodnota této deformace mění v závislosti na vzdálenost od hrany otvoru. Tato problematika se řeší nejvíce při tažení velkorozměrných výlisků, například kryty dveří u automobilu, kde dochází k rozšiřování otvorů. Pro měření jsou použity vzorky z materiálu s označením DX56D ZM90 BO od firmy Voest Alpine. Vzorky materiálu byly získány z odstřihů spodní části dveří. Přestože jsou otvory běžně vyráběny stříháním, pro tuto práci byly použity vzorky s otvory vyrobenými obráběním.

Předpoklad je, že se hodnota deformace bude s rostoucí hodnotou průměru otvoru také zvyšovat. Pro zjištění adekvátních výsledků je použito metody zkoušky rozšiřování otvoru podle Siebela a Pompa a vyhodnocováním pomocí optického 3D měřicího systému Aramis.

Důvodem zkoumání této problematiky je zjistit, zda průměr otvoru ve výlisku ovlivňuje výslednou deformaci materiálu. Tato vlastnost může zapříčinit poškození materiálu dříve, než bude díl vytažen.

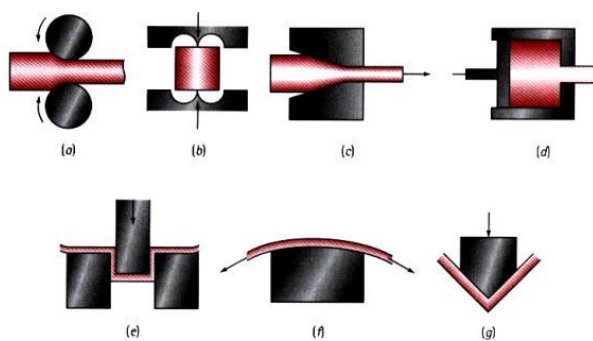
2. Teoretická část

2.1. Materiály pro tváření a ochranné povlaky

2.1.1. Druhy tváření a materiály

Tváření je technologický proces, při kterém za působení vnějších sil dojde ke změně tvaru polotovaru, či již hotového výrobku. Základem tváření je dosáhnout plastické deformace, která nastane při překročení meze kluzu. Tváření je výhodné z hlediska přesnosti výrobků, využití materiálu a relativně vysoké produktivity práce. Na druhou stranu jsou poměrně vysoké náklady na pořízení strojů a nástrojů pro tváření. [1]

Základní rozdělení druhů tváření je v závislosti na teplotě, přesněji řečeno na teplotě rekystalizace tvářeného materiálu. Rozdělujeme je do tří skupin. Tváření za studena (viz. Obr. 2.1), které probíhá pod teplotou rekystalizace, při kterém dochází k deformaci zrn ve směru tváření, což má za následek vznik textury. Také nastává zpevnění materiálu, které zvyšuje mechanické vlastnosti materiálu, ale snižuje tažnost. Tváření za tepla probíhá nad teplotou rekystalizace. Také dochází ke zpevnění, ale je eliminováno následnou rekystalizací a nevzniká textura. Tvářecí síly jsou až desetkrát menší, než u tváření za studena, ale vlivem vyšších teplot dochází k okujení, čímž je povrch nekvalitnější. Tváření za poloohřevu je kompromis mezi dvěma předešlými způsoby. Další hlavní rozdělení tváření je na tváření objemové, při kterém dochází k deformaci ve všech třech osách. Zástupci objemového tváření jsou například kování, válcování, protlačování. A tváření plošné, kde dochází k deformaci ve dvou osách. Kde jsou hlavními zástupci tažení, stříhání nebo ohýbání. [1] [2]

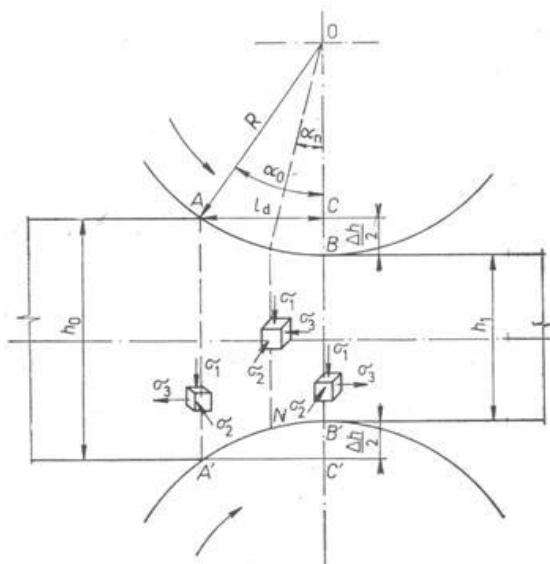


Obr. 2.1. Různé způsoby strojního tváření za studena: a) válcování, b) kování, c) protahování, d) protlačování, e) hluboké tažení, f) vypínání mat., g) ohýbání. [16]

Materiály vhodné pro tváření rozdělujeme podle vhodnosti jednotlivých tvářecích procesů. Důležitou skupinou mezi výrobky, které se vyrábějí lisováním, tvoří díly vyráběné tažením, resp. hlubokým tažením. Obecně se rozdělují z hlediska tvářitelnosti do čtyř skupin: MT - jakost vhodná k mírnému tažení, ST - jakost vhodná ke střednímu tažení, HT - jakost vhodná k hlubokému tažení, VT - jakost vhodná k velmi hl. tažení. Zařazení jednotlivých druhů plechů do těchto skupin závisí na jednotlivých mechanických vlastnostech a chemickém složení. Přesnějšího rozdělení plechů lze dosáhnout na základě dalších kritérií tvářitelnosti (metalografická analýza, koeficient plošné a normálové anizotropie a jiných). [2]

2.1.1.1. Válcování plechů

Plech se válcují hladkými válci na válcovacích stolicích z plochých předvalků. Nejprve se válcuje napříč, aby se dosáhlo potřebné šířky plechu, následně se plech otočí o 90° a válcuje se podélně. Tím se dosáhne stejnoměrné tloušťky a rovnoměrnějších vlastností materiálu v podélném i příčném směru válcování (viz. Obr. 2.2). Vyrábějí se jak plechy tlusté ($>3\text{mm}$), tak i tenké ($<3\text{mm}$). Pokud mají mít plechy velkou přesnost, dobré mechanické vlastnosti a hladký povrch, dokončují se válcováním za studena, přestože výchozím polotovarem jsou pásy válcované za tepla. [1]



Obr. 2.2. Vzniklé deformace během válcování [17]



2.1.1.2 Hlubokotažné plechy

Hlubokotažné plechy se vyznačují velmi dobrými plastickými vlastnostmi. Tyto plechy jsou vyráběny z ocelí s nízkým obsahem uhlíku a minimálním obsahem legur. Hlubokotažné plechy tloušťky 0,2-3,5mm jsou převážně z oceli třídy 11, žíhané, lehce převálcované nebo za studena doválcované a žíhané. Výhodou hlubokotažných plechů je vysoká deformační schopnost a výrazně nízká redukční tloušťka stěny při tažení materiálu. V případě vyčerpání plastičnosti materiálu, musí následovat mezioperační žíhání. Díky němu je materiál schopen se znovu tvářit.

Oceli uklidněné hliníkem určené pro hluboké tažení se rozdělují do několika skupin. CQ (Comercial Quality) jsou plechy běžné kvality. Dále DQ (Drawing Quality) jsou tažné plechy. DDQ (Deep Drawing Quality) toto označení odpovídá hlubokotažným plechům. EDDQ (Extra Deep Drawing Quality) jsou zvlášť hlubokotažné plechy. A EDDQ-S (Extra Deep Drawing Quality-Super) to náleží super hlubokotažným plechům. Další oceli určené pro hluboké tažení jsou refosforizované a mikrolegované ocele, plechy z IF ocelí bez intersticií, plechy z IF ocelí s BH efektem a plechy z vysokopevnostních ocelí. [3]

Plech z IF ocelí bez intersticií mají jako základ feritickou matici. Jsou mikrolegované titanem nebo niobem resp. jejich karbidy TiCN, NbCN. Tyto legury zajistí zvýšenou pevnost a dobrou tvářitelnost. Velmi malý obsah uhlíku a dusíku mají za následek výbornou tvářitelnost a nízkou pevnost. Plechy z IF ocelí jsou velmi odolné proti stárnutí, a to i po žárovém zinkování. Tyto plechy jsou využívány zejména v automobilovém průmyslu pro tvarově složité díly, jako jsou blatníky nebo kryty dveří. [3]

2.2.1. Povrchové úpravy

2.2.1.1. Důvod a použití povrchových úprav

Povrchové úpravy slouží zejména k ochraně materiálů vůči vnějším vlivům. Nejčastějším důvodem povrchových úprav je zamezení korozi nebo opotřebení povrchu součástí. Samozřejmě, jedním z faktorů je i konečný vzhled součástí. Nemusí se upravovat pouze povrchy kovů, ale lze také takto chránit i jiné materiály, například plasty, dřevo, sklo nebo beton.



Přestože patří povrchové úpravy mezi strojírenské technologie, tak některé jejich varianty jsou spíše chemického charakteru. Během povrchových úprav se používají nejrůznější chemické látky, zdraví nebezpečné přípravky nebo škodlivé látky vznikají během jednotlivých kroků výroby. [4]

Před samotnou operací úpravy povrchu je nutné povrch součásti připravit. Pokud by byla tato příprava vynechána, došlo by k nekvalitnímu ošetření povrchu vlivem špatného uchycení povlaku, či nátěru na povrchu dílu. Proto se musí povrch nejprve mechanicky připravit. Tím se rozumí například broušení, leštění, omílání, otryskávání či kartáčování. Díky tomu je povrch zbaven nečistot, okují, rzi. Následně se povrch odmastí, proběhne moření, odrezí a chemicky a elektrochemicky vyleští. [4]

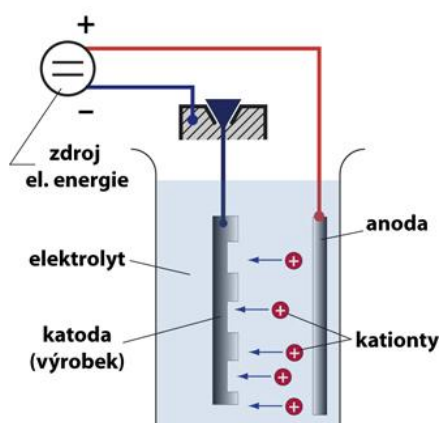
2.2.1.2. Druhy povrchových úprav

Povrchové úpravy můžeme rozdělit do třech skupin. První skupinou jsou kovové povlaky a vrstvy. Mimo mechanického nanášení kovových povlaků a vrstev lze použít elektrochemické pokovování (viz Obr 2.3), chemické pokovování, žárové stříkání kovu, žárové pokovení v roztavených kovových lázních nebo chemicko-tepelné zpracování. Další skupinou jsou nekovové anorganické povlaky a vrstvy. Opět mohou být nanесeny mechanicky, jako keramické smaltování nebo žárové stříkání vysokotavitelných keramických materiálů. Dalším způsobem nanášení těchto povlaků je oxidace, fosfátování, úpravy anorganickými nátěry. Poslední skupinou jsou organické povlaky a vrstvy vznikající úpravou organickými nátěry, plastovými povlaky, tmely a stěrkovými hmotami nebo dočasné ochrany za pomoci vosků, tuků či olejů. [4], [5]

1.2.1.3. Povrchová úprava Zn+Mg

Zinkohořčíkový povlak je mezi ochranami povrchů novinkou. Jedná se o alternativu ke zvýšení tloušťky vrstvy zinku. Materiál s touto povrchovou úpravou je určen především pro automobilový průmysl. Způsoby výroby tohoto povlaku jsou tři. Prvním z nich je PVD (Physical Vapor Deposition) s elektronovým paprskem. Při této metodě vzniká Zn_2Mg a $Zn_{11}Mg_2$. PVD je metoda nanášení kovů při povlakování. Jedná se o napařování (termické či vakuové). Napařování pomocí supersonické trysky, megnetronového napařování nebo diodového napařování.

Také je možnost nanášet povlak pomocí Iontového plátování nebo plasmového nástřiku. Druhou možností výroby Zn/Mg povlaku je dvoufázové pokovování. Při této metodě je nejprve nanesen zinek a poté hořčík. U této metody je nutné tepelné zpracování při teplotě 300°C po dobu 10 hodin. Poslední možností vzniku tohoto povlaku je kombinace předešlých dvou metod. Nejprve je běžným pokovením nanesen zinek, následovaný PVD. Poté proběhne krátká tepelná úprava při teplotě 250°C až 400°C. Produkce vzniku povlaku je u plechů 60m/min. [6]



Obr. 2.3. Pokovování; anoda: plát kovu, kterým pokovujeme; Katoda: výrobek nebo výrobky, na kterých je nanášen povlak; Elektrolyt: většinou kyselá nebo alkalická lázeň, která umožňuje navázání a přenos kationů kovu, kterým pokovujeme. [18]



2.2. Technologické zkoušky

2.2.1. Seznámení s technologickými zkouškami

Technologické zkoušky slouží ke zjištění vhodnosti materiálu pro následné technologické zpracování. Cílem technologických zkoušek je napodobit proces výroby a zjistit vhodnost materiálu pro danou technologii. Během zkoušek nezjišťujeme výsledky pomocí fyzikálních veličin, ale posuzuje se chování materiálu při daných operacích. Lze ale získat výsledky, které je možné porovnat s ostatními zkoušenými materiály. V některých případech jsou souběžně vykonávány také zkoušky mechanické, či zkoušky defektoskopické. Jedná se o doplnění podrobnějších informací o použitém materiálu, aby bylo možné podle naměřených hodnot dohledat vhodnější materiál pro danou technologii, pokud by původní materiál nevyhovoval. Mezi tyto zkoušky patří zkouška tvárnosti nebo zkoušení svarových spojů. Pomocí zkoušek se také zjišťuje jakost materiálů, což je jedním z ukazatelů pro vývoj a výrobu například polotovarů, ale také je to důležitá informace pro odběratele. [5]

2.2. 2. Mechanické zkoušky

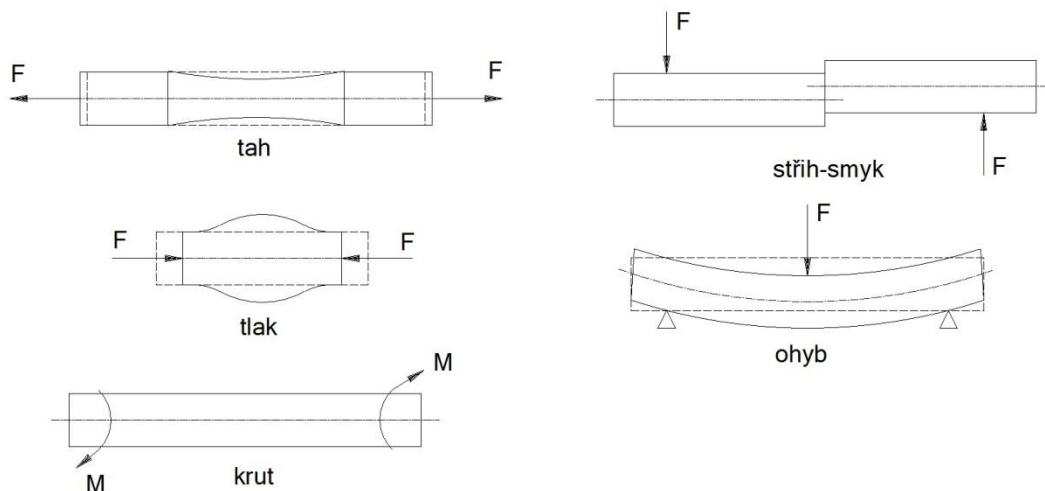
Mechanické zkoušky probíhají za působení vnějších sil. Podle způsobu zatěžování dochází k různým deformacím a poškozením vzorku. Dle druhu poškození můžeme určit vlastnosti daného materiálu. Jelikož materiál pro strojní součásti není homogenní a izotropní, pak hraje velkou roli místo odebrání vzorku pro provedení zkoušky. Proto je vhodné volit vzorek v místě, kde budou zjištěné vlastnosti nejdůležitější. Česká státní norma také udává, kolik vzorků má být zkoušeno. Je to dáno bezpečností či druhem výroby. Podmínky, za kterých jsou materiály zkoušeny, jsou mezinárodně sjednoceny, aby výsledky zkoušek poskytl možnost objektivního posouzení materiálů. [7] Jelikož jsou strojní součásti vystaveny různým teplotám, tak se zkoušky mohou provádět za normálních teplot tj. při teplotě 20°C, při zvýšených teplotách nebo při nízkých teplotách. To vše, pro zjištění nejpřesnějších vlastností materiálu, při dané situaci. Jedny z hlavních vlastností, které se při mechanických zkouškách posuzují je pevnost, což je odolnost materiálu proti porušení soudržnosti při jeho zatížení vnějšími silami. Dále se zkoumá tvrdost, to je odolnost materiálu proti vniknutí cizího tělesa do vzorku. Dále je věnována pozornost houževnatosti, což je odolnost materiálu, proti deformacím

vyvolaným vnějšími silami. A v neposlední řadě pružnost, což je schopnost se vrátit do původních rozměrů a tvaru po přestání působení vnějších sil.

2.2.2.1. Rozdělení mechanických zkoušek

1) Mechanická zkouška statická

Při těchto zkouškách dochází k pozvolnému zatěžování vzorku. Jsou zde úplně eliminovány rázy. Průběh zkoušky trvá řádově minuty, v některých případech i hodiny až dny. Při všech statických zkouškách vzniká v zatížené součásti napětí. Je to míra vnitřních sil, které vznikají v materiálu působením sil vnějších. Rozeznáváme napětí normálové σ (tah, tlak, ohyb) a napětí tečné τ (smyk, krut) (viz Obr. 2.4). Může být využito univerzálního zkušebního stroje. Hlavním hledaným parametrem u těchto zkoušek je pevnost. Jelikož je při každém druhu zatížení pevnost jiná, dělíme tyto zkoušky na zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu. Pro objektivitu a jednoznačnost zkoušek předepisuje norma pro jednotlivé zkoušky tvar, rozměry, jakost povrchu a způsob zhotovení zkušebních vzorků. [5]

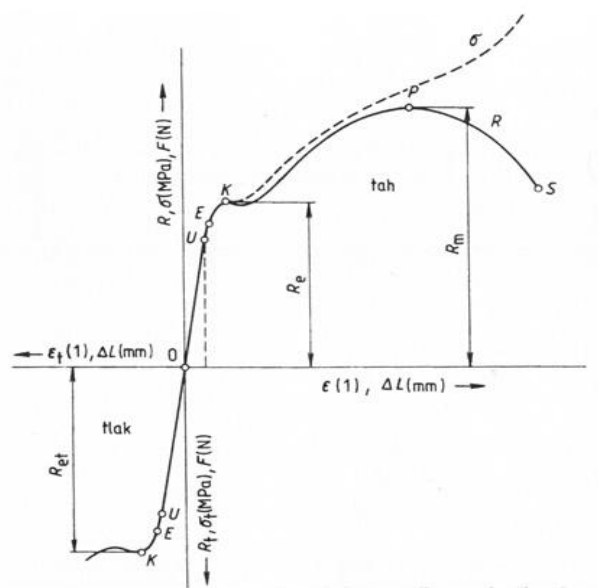


Obr. 2.4. Základní druhy namáhání materiálu [5]

Zkouška tahem

Tato zkouška je nejvýznamnější a nejzákladnější metodou zjišťování vlastností každého materiálu. Je prováděna téměř u každého materiálu, jelikož poznatky během měření získané, jsou potřeba pro návrh součástí a volbu materiálu, který bude pro jejich výrobu použit. Pomocí trhací zkoušky získáme pevnost v tahu, tažnost, poměrné prodloužení a kontrakci zkoušeného materiálu. [8] Jako vzorky se používají kruhové nebo ploché tyče s uzpůsobenými konci pro upevnění v čelistech

zkušebního, tak zvaného trhačího stroje. Rozměry a tvary zkušebních tyčí jsou normalizovány. Vzorek je umístěn mezi čelisti trhačího stroje a zatěžován dvěma silami působícími v ose vzorku. Vzorek je namáhán, dokud nedojde k jeho porušení (přetržení). Trhačí stroj je schopen vytvořit pracovní diagram závislosti zatěžující síly na prodloužení vzorku. Také se používá smluvní diagram, který je závislostí smluvního napětí na poměrném prodloužení. V těchto diagramech jdou odečíst veškeré hledané meze, které jsou mez úměrnosti, mez pružnosti, mez kluzu a mez pevnosti (viz. Obr. 2.5). Dále lze pomocí trhačí zkoušky zjistit, kontrakce nebo tažnost. [5]



U...mez úměrnosti

E... mez elasticity

K...mez kluzu

P...mez pevnosti

S...místo přetržení tyčinky

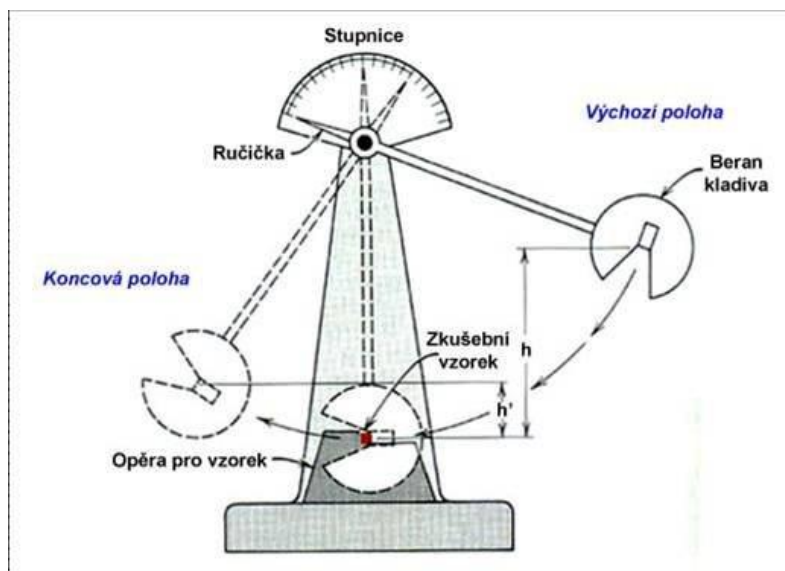
Obr. 2.5. Trhačí diagram [5]

2) Mechanické zkoušky dynamické

V praxi jsou strojní součásti často namáhány náhlými silami, které mění svou velikost a smysl. Při těchto namáháních není potřeba takové napětí pro porušení materiálu, jako v případě statického namáhání. Proto se provádí dynamické zkoušky, které mají testovat vzorky, na tento způsob namáhání. [5] Jedná-li se o namáhání náhlé, ve většině případů trvá jen zlomek sekundy, tak označujeme toto zatížení jako rázové. V případě proměnlivého namáhání, se jedná o zatížení cyklické. Vznik náhlého lomu ovlivňuje nízká teplota, složitost stavu napjatosti a rychlost deformace. [9]

Zkouška rázem

Slouží k určení houževnatosti nebo křehkosti materiálu. Nejznámější metodou je metoda podle Charpyho (viz. Obr 2.6). Při této zkoušce je vzorek o tvaru hranolu s normalizovanými rozměry položen na dvou podpěrách (v případě metody podle Izoda je vzorek uchycen za jeden konec). V případě houževnatých ocelí je vzorek opatřen vrubem. Kladivo je zpuštěno z vrchní polohy. Ve spodní části udeří kladivo do vzorku. Následně překývne a zaznamená se jeho koncová poloha, která je níže než původní výška, jelikož vzorek část kinetické energie kladiva spotřeboval. Následně se získá potřebná práce z tíhy kladiva a rozdílu výšek. Ukazatel houževnatosti materiálu je deformační práce na jednotku průřezu v místě nárazu kladiva neboli vrubová houževnatost R . [10]

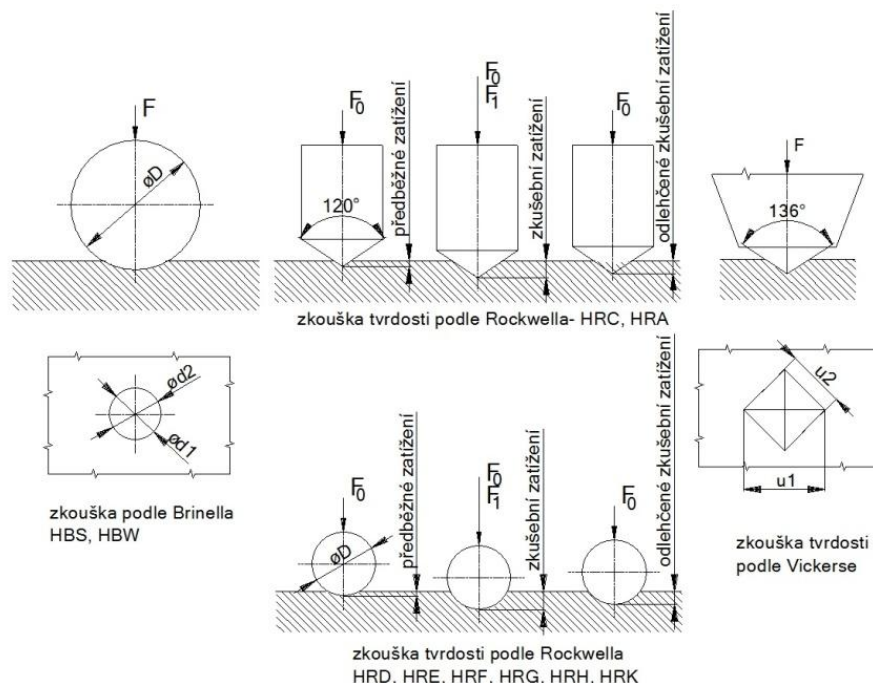


Obr. 2.6. Charpyho kladivo [10]

3) Zkoušky tvrdosti

Tvrdostí se rozumí odpor materiálu, proti vniknutí cizího tělesa. Na základě této definice se provádí zkoušky tvrdosti. Do povrchu zkoušeného materiálu je vtlačováno zkušební tělísko, jehož tvar a použitý materiál se liší v závislosti na použité zkoušce. Dle zanechaného otisku se určuje tvrdost materiálu. Nejznámějšími zkouškami tvrdosti jsou zkoušky podle Brinella, Rockwella a Vickerse (viz. Obr. 2.7). Největšími výhodami těchto zkoušek je snadné a rychlé provedení a možnost provést zkoušku na hotovém výrobku, aniž by došlo k jeho znehodnocení. U zkoušky podle Brinella je zkušebním tělískem ocelová kalená kulička. Zde se hodnotí průměr

vtisku. U zkoušky podle Rockwella je zkušebním tělískem diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° . Při této zkoušce se hodnotí hloubka vtisku. Výhodou této zkoušky je možnost měření vzorků s nekvalitním povrchem. Při zkoušce podle Vickerse je vtlačován diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Hledaným měřítkem jsou délky úhlopříček a jejich následný průměr.[5]



Obr. 2.7. Ukázka tělísek a vtisků pro metody podle Brinella, Rockwella, Vickerse[5]

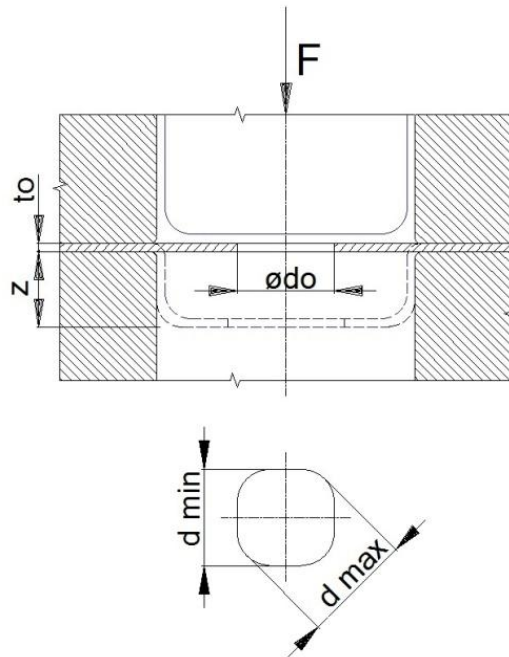
2.2.2.2. Defektoskopie

Za zmínění stojí i defektoskopie. Defektoskopie se řadí mezi zkoušky bez porušení materiálu. Při této zkoušce se zjišťují vady materiálu. Vlivem zpracování materiálu může dojít ke vzniku různých vad, jako jsou bubliny uvnitř součásti, zalitý formovací písek, při kování vniknutí okujů do struktury materiálu nebo při tváření vznik prasklin. Tyto vady nemusí být pouhým okem viditelné, dokonce mohou být ukryty uvnitř materiálu. Z tohoto důvodu používáme defektoskopické zkoušky, které dovedou tyto vady odhalit. V případě povrchových vad se používají například zkoušky kapilární nebo magnetické. U zjišťování vad vnitřních se používají nejčastěji zkoušky prozařováním nebo ultrazvukem. Použití těchto zkoušek zajistí, aby nebyla zbytečně vynaložená práce při dalším zpracování materiálu a následném možném poškození při používání již zhotovených výrobků. Výhodou těchto zkoušek je, že není potřeba používat vzorky. Zkoumá se celá součást. Další výhodou, oproti ostatním zkouškám, je možnost kontroly všech dílů. U ostatních zkoušek nelze

zajistit, že jsou všechny součásti stejné. Díky nedestruktivním zkouškám je možné zkontrolované díly dále použít.[5]

2.2.3. Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa

Pomocí této zkoušky se hodnotí vhodnost zkoušeného plechu pro hluboké tažení. Zkoušeným vzorkem je kruhový nebo čtvercový přístřih s otvorem uprostřed. Průběh zkoušky spočívá v upnutí zkoušeného vzorku do lisu. Následně je vložen přidržovač, aby nedošlo k cípatění. Posléze je vzorek tažen válcovým tažníkem s rovným čelem (viz Obr. 2.8). Při tažení dochází k rozšiřování původního otvoru. Tažení probíhá do té doby, dokud nevznikne na okraji otvoru první trhlinka. Poté je vzorek vyjmut z lisu a následuje měření průměru otvoru. V důsledku anizotropie materiálu není otvor kruhový. [11]



Obr. 2.8. Princip zkoušky podle Siebela a Pompa [11]

Proto se měří minimální a maximální rozměr otvoru a z jejich následného průměru získáme rozšíření otvoru. Dále se vyhodnocuje hloubka prohloubení, nerovnoměrnou deformaci otvoru vlivem již zmíněné anizotropie, která lze spočítat dle vzorečku (1):

$$\frac{d_{max}-d_{min}}{d_o} (-). \quad (1)$$



d_{\max} maximální rozšíření otvoru (mm)

d_{\min} minimální rozšíření otvoru (mm)

d_0 průměr předstřiženého otvoru (mm)

K jednotnému určení vhodnosti plechu k hlubokému tažení se využije vztahu (2):

$$q = \frac{t_0 \cdot (d_{\max} + d_{\min})^2}{4 \cdot d_0 \cdot (d_{\max} - d_{\min})} (-) \quad (2)$$

q míra vhodnosti plechu k hlubokému tažení dle Siebela a Pompa (-)

t_0 tloušťka plechu (mm)

d_{\max} maximální rozšíření otvoru (mm)

d_{\min} minimální rozšíření otvoru (mm)

d_0 průměr předstřiženého otvoru (mm)

Z výsledků této zkoušky lze vypožorovat, že čím je prohloubení (z) a rozšíření otvoru větší, a čím je plošná anizotropie menší, tím je daný plech pro hluboké tažení vhodnější. [11]



2.3. Zaznamenávání měření

2.3.1. Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je vědecký obor zabývající se analýzou vyfocených snímků, ze kterých získáme potřebné informace o objektu, především geometrických vztahů.

Jako první fotogrammetrii použil Leonardo Da Vinci, ale název fotogrammetrie zavedli až Aime Laussedat a Albrecht Meydenbauer v roce 1851. Byli to zakladatelé výroby dokumentací historických stavebních objektů, tvořenou skoro 16000 snímků. Slovo fotogrammetrie je složeno z řeckých slov. Fótos-světlo, Gramma-písmeno, zápis a Metrie-měření. To znamená, že překlad by mohl znít: Měření na záznamu pořízeného pomocí světla.

Oborů, které využívají fotogrammetrii je široké spektrum. Rozděluje se podle místa pořízení a jejich vzdálenosti na fotogrammetrii vesmírnou (snímky ze satelitů), leteckou (řádově několik kilometrů), pozemní snímky z povrchu v řádech stovek metrů, blízká fotogrammetrie do stovky metrů a makro (makroskopické záběry). Další dělení je podle počtů snímků potřebných pro vyhodnocení. Jednosnímková fotogrammetrie umožňuje měření v rovinném prostoru. Dvousnímková dovoluje získat prostorové souřadnice. A vícesnímková, u které se počet snímků volí podle druhu hledaného parametru.

Výhodou této metody je bezkontaktní způsob měření. Měřené objekty mohou být i značně vzdáleny nebo umístěny ve špatně přístupných nebo nebezpečných prostředích. [12]

2.3.2. Systém ARAMIS

"Aramis je bezdotykový, optický 3D měřicí systém pro měření a analýzu deformací na povrchu zkoušených vzorků. 3D znázornění je zajištěno dvěma kamerami. Grafické znázornění výsledků měření zajišťuje optimální porozumění chování testovaných materiálů. Je vhodný zvláště pro třídímenzionální měření deformace při statickém nebo dynamickém zatížení za účelem analýzy na reálných konstrukčních prvcích. Většina funkcí systému je řízena softwarem. K dispozici je funkce měření, vyhodnocování, znázornění a tisku. Všechny funkce se vyvolávají pomocí rolovací nabídky funkcí, aktivačních kláves, příkazů makra nebo dialogových oken." [13]

Vlastnosti měřicího systému Aramis se dobře hodí pro měření trojrozměrných deformací a k určení napětí uvnitř součástí v rámci statického nebo dynamického zatížení. [13]

Výhodou systému Aramis je jednoduchost přípravy vzorku. Systém pracuje s náhodným vzorem, který vznikne na povrchu vzorku. Další výhodou je možnost použití jednoho senzoru pro více druhů vzorků. Jeden senzor dokáže měřit malé i velké předměty (1 mm až 1000 mm) a napětí v rozmezí od 0,05% až do několika 100%. Výsledky obsahují vysoký počet datových informací, které pomáhají k lepšímu znázornění výsledků, a tím k lepšímu pochopení průběhu deformací. Vzhledem k jednoduché stavbě kamerového systému, kompaktní měřicí soupravě a vysoce rozvinutému systému pro analýzu je celý komplet vysoce účinný a flexibilní (viz. Obr. 2.9). [14]

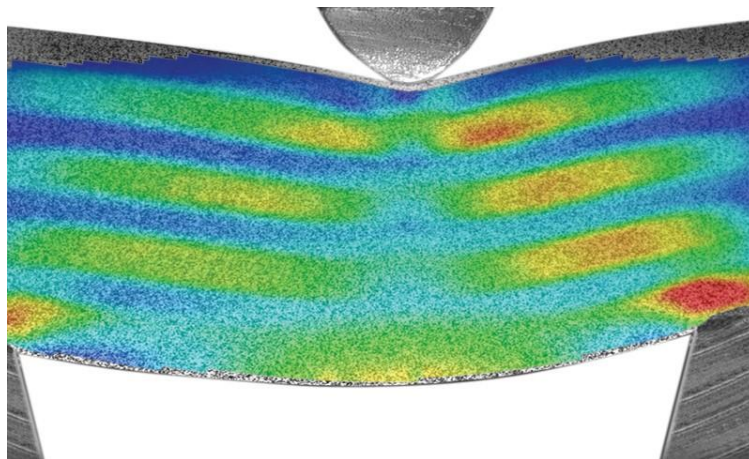


Obr. 2.9. Kamera a počítač vybaven systémem Aramis [14]

Systém Aramis má široké uplatnění. Nepoužívá se pouze pro diagnostiku při zkoušení materiálu (viz. Obr. 2.10), ale také jde použít při zkoumání charakteristiky procesu tečení, dimenzování součástek nebo charakteristiky procesu stárnutí. [14]

Systém Aramis můžeme rozdělit na čtyři základní typy. První ARAMIS 4M je určen pro měření deformací, u kterých je nejdůležitější vysoké rozlišení a záznamová rychlost kamer. Snímání vzorků frekvencí 55 Hz zajišťují nové typy kamer. ARAMIS 5M je vhodný pro měření velkých objektů a je možno měřit

pomocí vyššího rozlišení. Zde je rozlišení oproti systému ARAMIS 4M vyšší a snímkovací frekvence je 15 Hz. Systém ARAMIS 12M je využíván pro měření lokálních deformací díky nejvyššímu rozlišení senzoru, a to s vysokou přesností. Snímací rychlost při plném rozlišení je 24 Hz. Posledním zástupcem skupiny těchto systémů je ARAMIS HS, určený speciálně pro velmi rychlé dynamické děje. Při plném rozlišení dosáhne snímkovací frekvence hodnoty až 500Hz. [13]



Obr. 2.10. Simulace průběhu deformací v systému Aramis [13]



3. Experimentální část

Hlavním úkolem experimentální části je zjistit, zda má obrobený otvor ve vzorku vliv na velikost vzniklé mezní deformace a její průběh v závislosti na vzdálenosti od hrany otvoru.

Pro měření byl použit materiál z hlubokotažného plechu Voest Alpine s označením jakosti DX56D ZM90 BO. Vzorky byly taženy na dvojčinném lisu s konstantním průměrem tažníku.

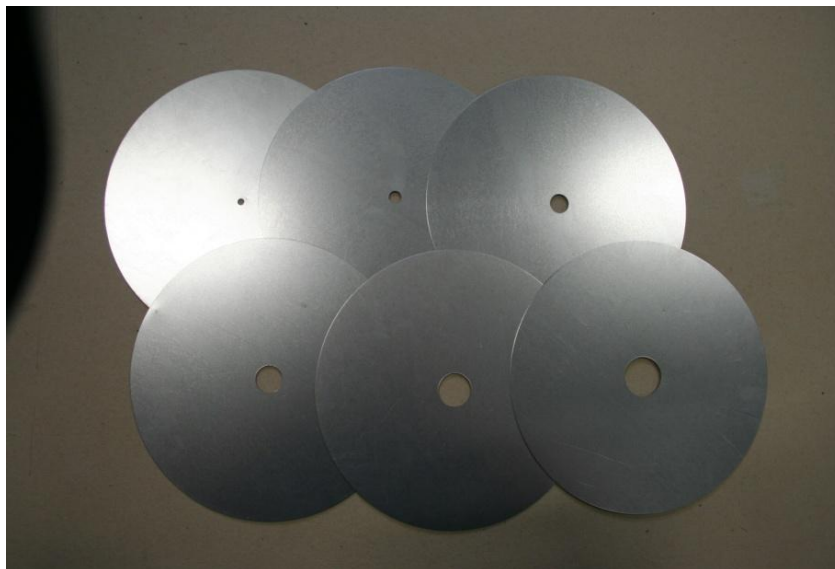
Pro zjištění hledaných informací bylo použito dvou metod. První byla zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa, tedy její část. Bylo využito informací o průměru původního obrobeného otvoru a rozměru rozšířeného otvoru. Pomocí těchto dat bylo možné spočítat mezní deformaci na hraně otvoru. Následně byl vytvořen graf závislosti mezní deformace na průměru otvoru. Pomocí tohoto grafu bylo možné vyhodnotit, že průměr obrobeného otvoru nemá na mezní deformaci vliv.

Druhá metoda pro vyhodnocení vzorků proběhla za pomoci bezdotykového, optického 3D měřicího systému Aramis. Pro tuto techniku vyhodnocení bylo potřeba vzorky opatřit barevným nástřikem. Konkrétně bílou a černou barvou, aby vznikl potřebný vzor. Celý průběh tažení byl nasnímán kamerami, instalovanými přímo na lis. Získané snímky byly dále vyhodnoceny systémem Aramis. Pomocí tohoto systému bylo možné určit průběh gradientu deformace pro vzorky s otvory o průměru 10mm a 30mm. Po jejich porovnání bylo možné říci, že průměr obrobeného otvoru ovlivňuje průběh deformace v závislosti na vzdálenosti od hrany otvoru.

3.1 Měření hlubokotažných plechů

3.1.1. Příprava vzorků

Pro měření byly k dispozici kruhové přístřihy z hlubokotažného plechu Voest Alpine s označením jakosti DX56D ZM90 BO a tloušťky 0,8mm s povrchovou úpravou Zn + Mg z odstřihů spodní části dveří automobilu získaný z Technického servisu lisoven a svařoven ŠKODA AUTO a.s.. Přístřih má průměr 210mm a do jeho středu byly obráběním vyhotoveny otvory o průměrech 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm (viz. Obr. 3.1). Je nutné, aby byly otvory vyrobeny v osovém středu přístřihu. V každé sadě průměru otvoru bylo vyrobeno šest vzorků. Všechny vzorky se použijí k měření a numerickému výpočtu deformací. A od každé sady vzorků se dva použijí pro metodu vyhodnocení pomocí systému Aramis.



Obr. 3.1. Přístřihy s vyhotovenými dírami

Před samotným průběhem zkoušky byly nejprve přeměřeny vytvořené otvory ve vzorcích. Jelikož mohla během výroby vzniknout určitá nepřesnost, je lepší vzorky překontrolovat.



Tab. 5.1 přeměřené původní průměry děr

$\varnothing d$ (mm)	$\varnothing d_0$ (mm)	s (mm)
5	5,05	0,01
10	10,02	0
15	15,03	0,01
20	20,10	0,04
25	25,03	0,01
30	30,02	0,02

$\varnothing d$požadovaný průměr otvoru (mm)

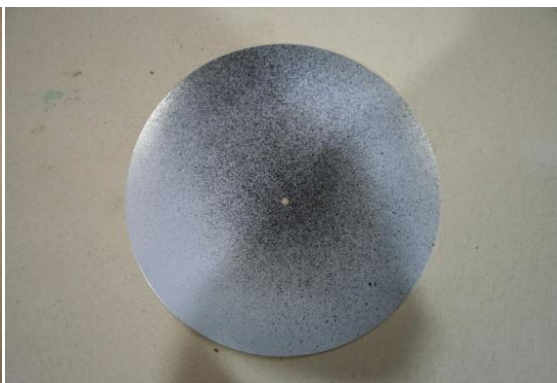
s.....směrodatná odchylka (mm)

$\varnothing d_0$střední hodnota průměru otvoru (mm)

Všechny vzorky byly nejprve důkladně očištěny a odmaštěny. Následně na vzorky, určené pro vyhodnocování pomocí systému Aramis, byly opatřeny barevným nástřikem. Z jedné strany byla nanесena bílá barva (viz. Obr. 3.2.). Po jejíž zaschnutí byly vzorky lehce postříkány také černou barvou, ale pouze tak, aby na povrchu vznikl potřebný vzor, tzv. pattern, pro následné měření (viz. Obr. 3.3.).



Obr. 3.2. Vzorek po nanесení bílé barvy

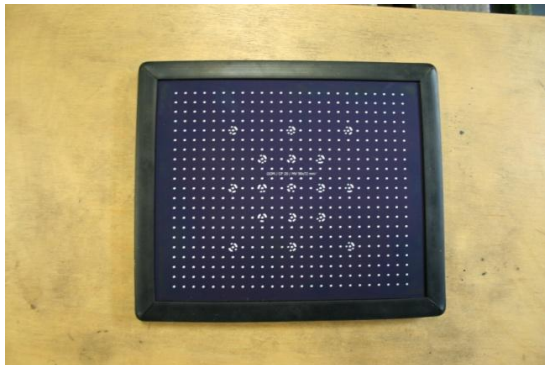


Obr. 3.3. Vzorek po nanесení černé barvy

3.1.2. Průběh měření

Po přípravě vzorků bylo nutné upravit vybavení lisu pro měření. Na lis byly připevněny dvě kamery (viz. Obr. 3.5), jelikož se jedná o dvousnímkový měřicí systém, který bude snímat průběh deformace plechu při tažení tažníkem. Následně bude jejich záznam použit k simulaci deformací a vyhodnocování vzorků pomocí

systému Aramis. Z důvodu absence automatického zaostřování je nutné kamery nejprve kalibrovat pomocí kalibrovací destičky (viz obr 3.4), která byla postupně nasnímána z několika úhlů, dle instrukcí systému.



Obr. 3.4. Kalibrační destička



Obr. 3.5. Kamery umístěné nad tažnicí

Samotné měření probíhá umístěním vzorku do dvojčinného lisu (viz. Obr. 3.6) a vložení přidržovače. Poté je spuštěn lis, který nejprve prvním pracovním válcem zajistí přidržení vzorku, aby nedošlo k jeho vtažení pod tažník. Druhý válec ovládá tažník zkušebního přípravku (viz. Obr. 3.7), který působí na vzorek. Jakmile se začne vzorek deformovat, je nutné sledovat hranu obrobeného otvoru uprostřed vzorku. Ve chvíli, kdy se na okraji objeví první radiální trhlinka, je nutné s tažením přestat. Oba písty se vrátí do počáteční polohy a odlehčený vzorek je možné vyjmout. Takto jsou postupně vytaženy všechny vzorky. Celý průběh tažení je zaznamenáván kamerami, které snímají rychlostí 6 snímků za sekundu. Tyto snímky se ukládají k následnému vyhodnocení.

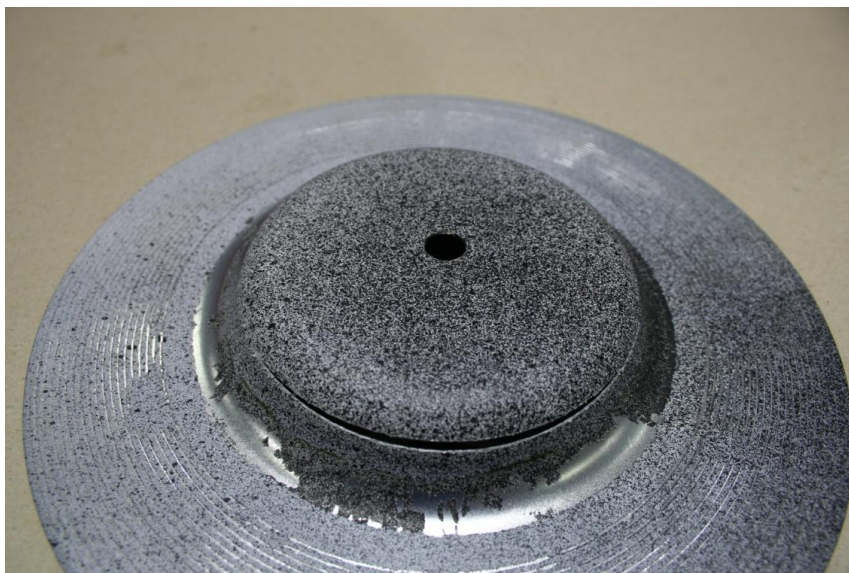


Obr. 3.6. Upravený lis s kamerami



Obr. 3.7. Zkušební přípravek s tažníkem

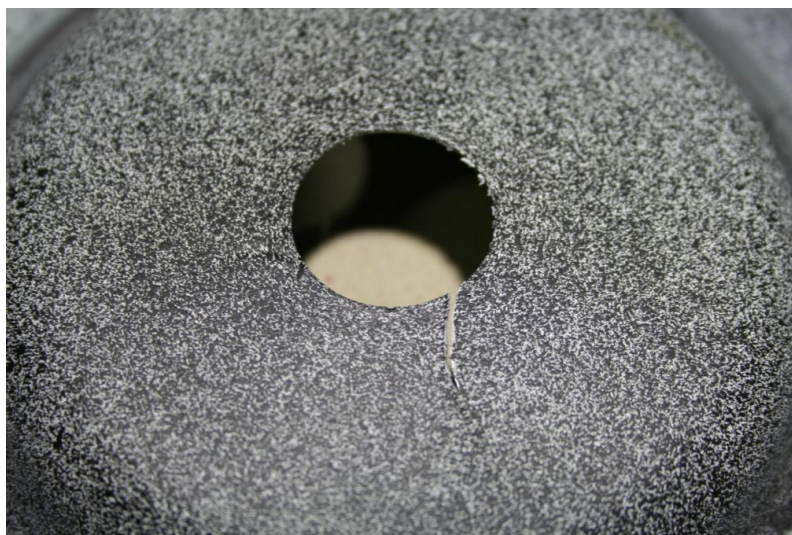
Při měření bylo zjištěno, že vzorek s původním otvorem o průměru 5mm není pro tuto zkoušku vhodný. Jelikož deformační odpor pro rozšíření otvoru je větší než odpor pro vypínání vzorku. Dojde k utržení materiálu bez rozšiřování otvoru (viz. Obr. 3.8). Pro tento průměr není zkouška relevantní.



Obr. 3.8. Prasklina na vzorku s otvorem o průměru 5mm

Ostatní vzorky se deformovaly dle počátečního odhadu a trhlinka vždy vznikla na hraně rozšířeného otvoru (viz. Obr. 3.9). U některých vzorků vzniklo několik malých trhlin na více místech. Toto poškození, ale pro další zkoumání a vyhodnocování nevádí. U jednoho vzorku s počátečním průměrem otvoru 30 mm došlo k přetažení a vzniku moc velkého rozšíření otvoru a výrazné praskliny. Aby nedošlo ke zkreslení

výsledných dat, byl tento vzorek vyřazen z dalšího vyhodnocování numerickou metodou. Pro vyhodnocení pomocí systému Aramis to není nutné, jelikož nepracuje s konečnou podobou vzorku, ale s celkovým průběhem deformace. Všechny ostatní vzorky bylo možné použít pro oba způsoby vyhodnocení.

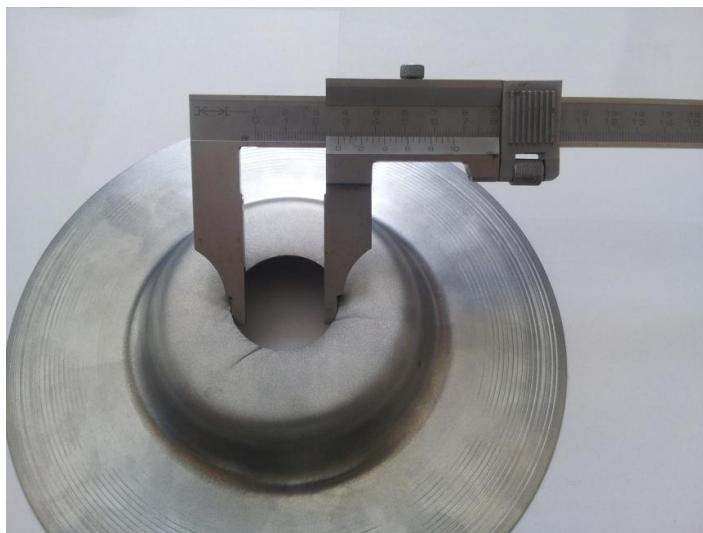


Obr. 3.9. Trhlina na obvodu otvoru

3.1.3. Vyhodnocení vzorků podle Siebela a Pompa

Přestože se nejedná o celou zkoušku rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa, jsou zde využity poznatky, v této zkoušce zjištěné. Jak už bylo dříve řečeno, z této metody vyhodnocování byly vyřazeny vzorky s počátečním průměrem obrobeného otvoru 5 mm a jeden vzorek s počátečním průměrem 30 mm, a to z důvodu nevhodnosti pro tento experiment.

Jelikož je pro tento způsob vyhodnocení vzorků potřeba vědět původní rozměry otvorů, byly tyto informace zjištěny během přípravy vzorku, kdy došlo k přeměření původních průměrů otvorů. Následně je potřeba změřit rozšířené otvory (viz. Obr. 3.10). Pro získání průměrné hodnoty rozšířeného otvoru bylo nutné, aby byl rozšířený otvor změřen na pěti různých pozicích. Jelikož vlivem anizotropie materiálu mohlo být namáhání v různých směrech jiné, a tím dojít k rozdílnému deformování otvoru.



Obr. 3.10. Měření průměru rozšířeného otvoru

Po spočítání středních hodnot průměrů, bylo získáno u každého otvoru dostatek hodnot na výpočet celkové střední hodnoty průměru otvoru a směrodatné odchylky pro celou sadu vzorků.

Tab. 5.2. Rozměry rozšířeného otvoru

$\varnothing d$ (mm)	$\varnothing D$ (mm)	s (mm)
10	23,909	0,39
15	36,072	0,55
20	47,774	0,74
25	60,047	0,81
30	71,537	0,87

$\varnothing D$střední hodnota průměru rozšířeného otvoru jedné sady vzorků (mm)

s.....směrodatná odchylka (mm)

Pomocí hodnoty průměru rozšířeného otvoru a hodnoty původního průměru otvoru mohla být spočítána měrná deformace φ . Tato deformace se spočítá jako přirozený logaritmus poměru konečného průměru ku původnímu průměru otvoru, vztah (3).

Tab. 5.3. Hodnoty měrných deformací

$\varnothing d_0$ (mm)	10,02	15,03	20,10	25,10	30,02
$\varnothing D$ (mm)	23,909	36,072	47,774	60,047	71,537
φ (-)	0,8717	0,8754	0,8707	0,8763	0,8684



Ukázka výpočtu deformace:

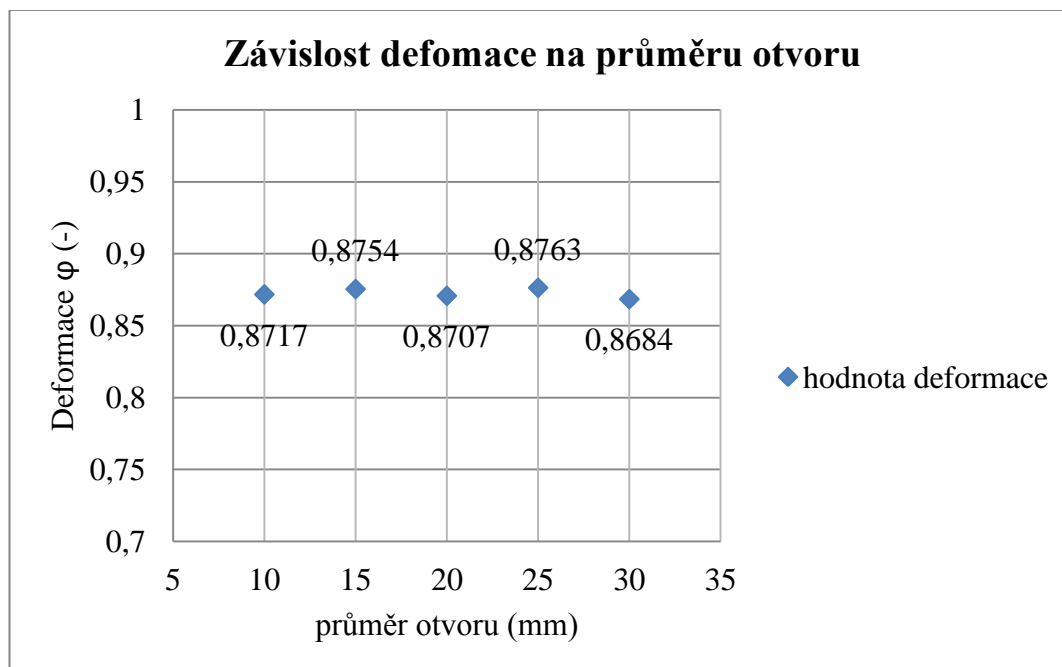
$$\varphi = \ln \frac{\varnothing D}{\varnothing d_0} = \frac{23,909}{10,02} = 0,8717 \text{ (-)} \quad (3)$$

φměrná deformace (-)

$\varnothing D$střední hodnota průměru rozšířeného otvoru jedné sady vzorků (mm)

$\varnothing d_0$průměrná hodnota průměru otvoru (mm)

Po získání těchto informací mohl být vytvořen graf (viz. Obr. 4.11) závislosti deformace na hraně rozšířeného otvoru a průměru otvoru.



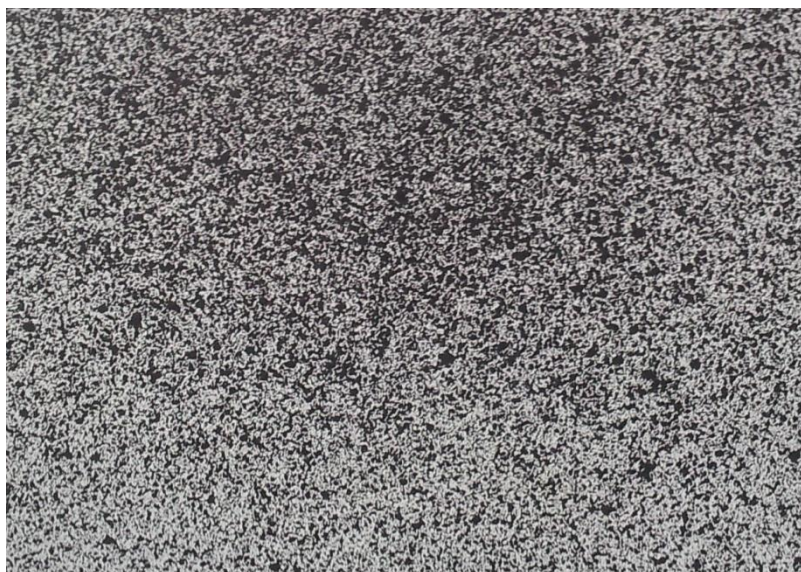
Obr. 3.11. Graf závislosti deformace na průměru otvoru

3.1.4. Vyhodnocení vzorků pomocí systému Aramis

Průběh celého měření byl zaznamenáván kamerami umístěnými na dvojčinném lise, které snímaly celý průběh tažení vzorku rychlostí 6 snímků za sekundu. Jednotlivé snímky byly ukládány pro pozdější zpracování systémem Aramis.

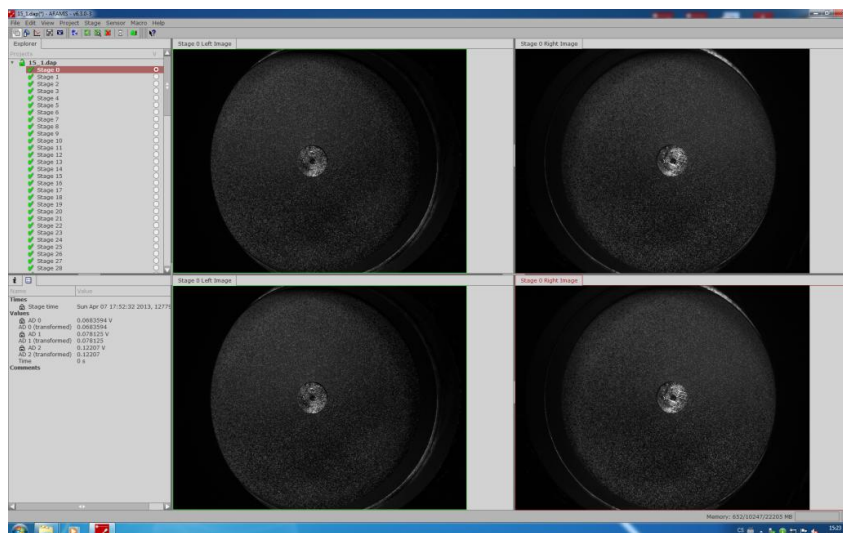
Použité vzorky pro tuto metodu byly opatřeny speciální úpravou. Jednalo se o celkový nástřik bílou barvou a po jejím zaschnutí následoval lehký postřik černou barvou, aby ve výsledku vznikl vzor nutný pro následné měření, tzv. pattern (viz.

Obr. 3.12). Důvod této úpravy vzorků je, že si systém Aramis rozděluje měřený prostor na prvky o rozměrech 14x10 pixelů a počítá si poměr černé a bílé barvy uvnitř této výseče. Pomocí této informace bylo vygenerováno číslo odpovídající stupni šedi. A na dalším snímku byl systémem Aramis hledán odpovídající prvek se stejnou hodnotou stupně šedi, a tím je Aramis schopen sledovat, kam se přesunul. Takto může být zkoumán celkový průběh deformace snímané součásti. Jednotlivé výseče se překrývají z důvodu spojitosti měření, a to o 30%.



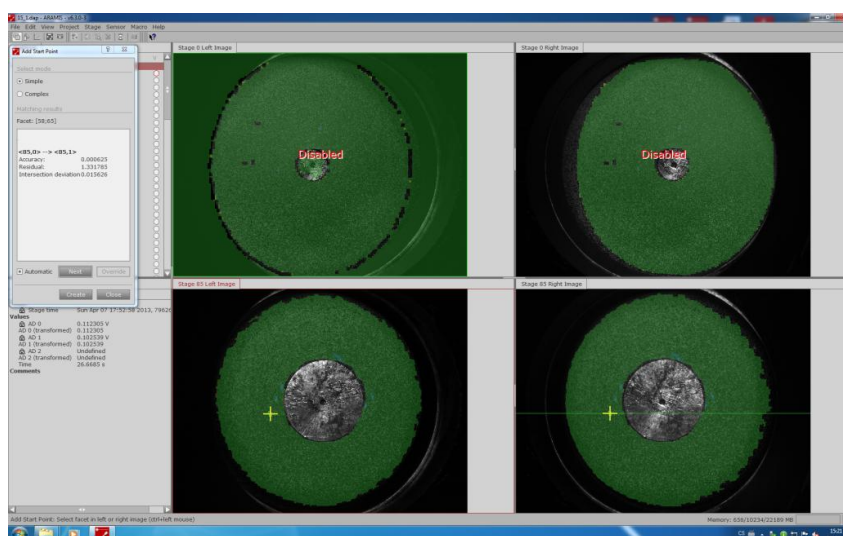
Obr. 3.12. Vzor vzniklý na povrchu vzorku, tzv. pattern

Poté, co byly všechny vzorky nasnímány, byla získaná data přenesena do počítače, který byl vybaven systémem Aramis. Po jeho spuštění byl nahrán soubor s fotografiemi z celého průběhu tažení jednoho vzorku. Po načtení snímku bylo možné na ploše vidět první snímek tzv. Stage 0, který odpovídá vzorku před namáháním. Přestože záznam probíhal dvěma kamerami, tak na pracovní ploše byly čtyři snímky. Dva stejné snímky z levého pohledu a dva z pravého pohledu (viz. Obr. 3.13). Přičemž vrchní dva snímky odpovídaly záznamu kamery před namáháním. Spodní dvojice snímků sloužila k operacím v systému Aramis popsáných v dalších krocích.



Obr. 3.13. Obrazovka po načtení záznamu

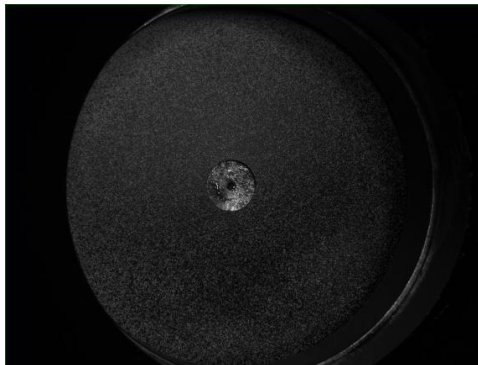
Nejprve bylo potřeba spustit simulaci výpočtu deformací v materiálu součásti. Tomu musela předcházet volba startovacího bodu, díky kterému byl systém schopen sledovat a počítat průběh deformace (viz. Obr. 3.14).



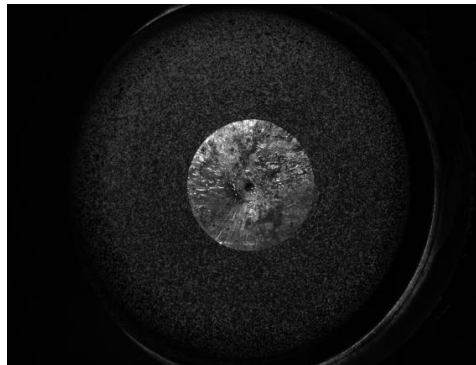
Obr. 3.14. Určení startovacího bodu

Výpočet postupně probíhal na všech snímcích. Po jeho skončení bylo získáno grafické znázornění deformace od počátku namáhání až po jeho ukončení. Hodnota deformace před namáháním je nulová, což odpovídá modré barvě (viz. Obr. 3.19). Na konci namáhání je vidět barevné znázornění deformace. Odpovídajícímu stupni deformace náleží určitá barva. Je zde rozmezí od modré po červenou, kde červená barva znamená v danou chvíli maximum (viz. Obr. 3.20). Na barevném rozložení deformace lze vypožorovat, že hodnota deformace není po celém obvodu otvoru stejná. Je to dáno anizotropií materiálu. V barevném znázornění je možné vidět místa

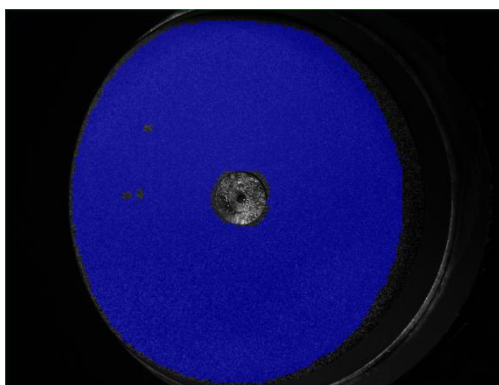
bez určení deformace (viz. Obr. 3.18). Je to dáno tím, že systém Aramis je optickou metodu měření, a tak se může stát, že v některých místech neproběhne výpočet vlivem chyby v záznamu nebo špatným nanesením barvy v daném místě.



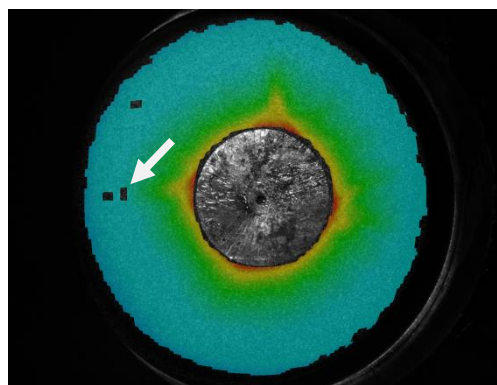
Obr. 3.15. Vzorek na začátku namáhání



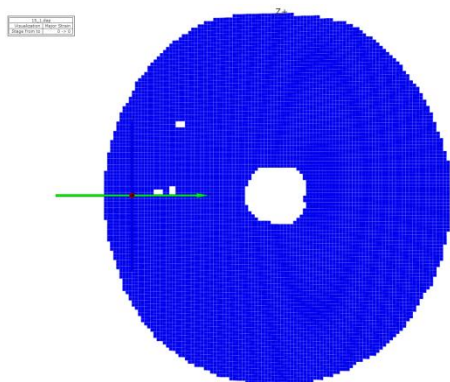
Obr. 3.16. Vzorek na konci namáhání



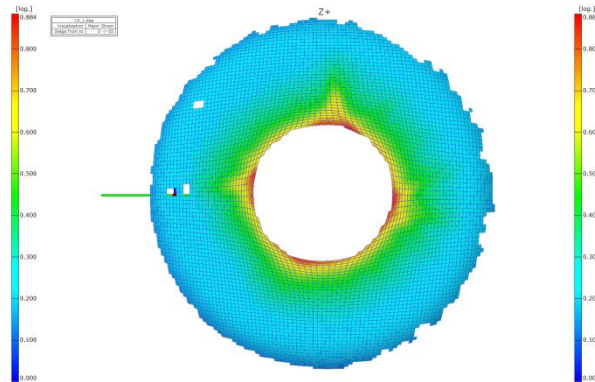
Obr. 3.17. Vzorek na začátku namáhání se znázorněným průběhem deformace



Obr. 3.18. Vzorek na konci namáhání se znázorněným průběhem deformace



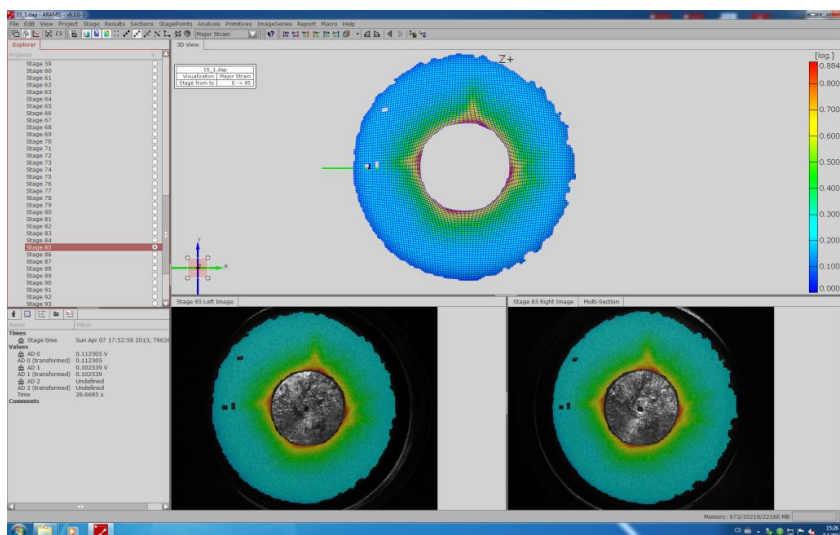
Obr. 3.19. Průběh deformace na začátku namáhání



Obr. 3.20. Průběh deformace na konci namáhání

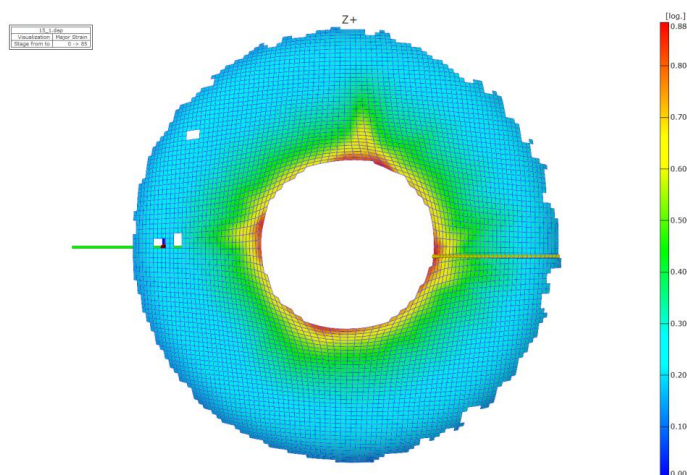
Po proběhnutém výpočtu bylo dalším krokem získání průběhu závislosti deformace, v době vzniku první trhliny, na vzdálenosti od okraje rozšířeného otvoru. Jako první bylo nutné určit snímek odpovídající době těsně před vznikem první trhliny. V tuto dobu by měla být hodnota deformace největší. Proto bylo nutné

prozkoumat jednotlivé snímky postupně, podrobně a hledat první náznak vzniku trhliny. Po nalezení daného snímku se nadále pracovalo se snímkem, který byl o jednu pozici před ním. Tím byl získán potřebný záznam vzniklý v době těsně před vznikem trhliny (viz. Obr. 3.21).



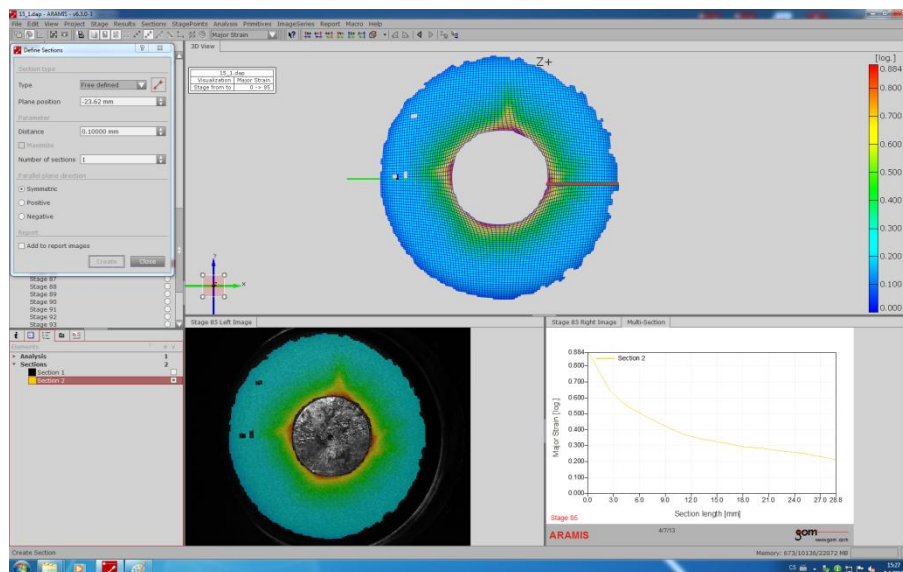
Obr. 3.21. Snímek před vznikem trhliny

Na okraji otvoru bylo nutné najít místo s největší deformací, které nemusí být vždy shodné s místem vzniku trhliny. Od tohoto místa byl vytvořen řez, vedený kolmo na hranu otvoru a vedený přes celý znázorněný prostor (viz. Obr. 3.22).



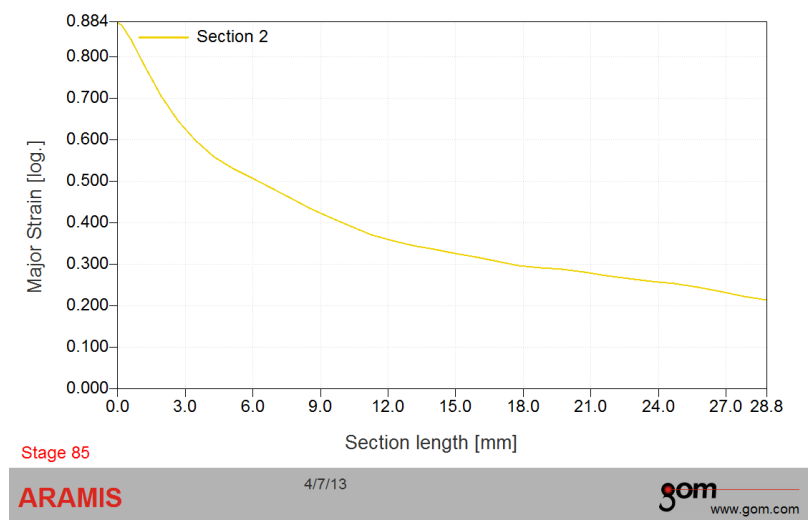
Obr. 3.22. Místo vzniku řezu

Při jeho zadávání bylo potřeba určit polohu souřadného systému, jak ve směrech os x , y , z , ale také bylo nutné umístit souřadný systém tak, aby rovina x , y byla shodná s povrchem vzorku (viz. Obr. 3.23).



Obr. 3.23. Plocha při zadávání řezu

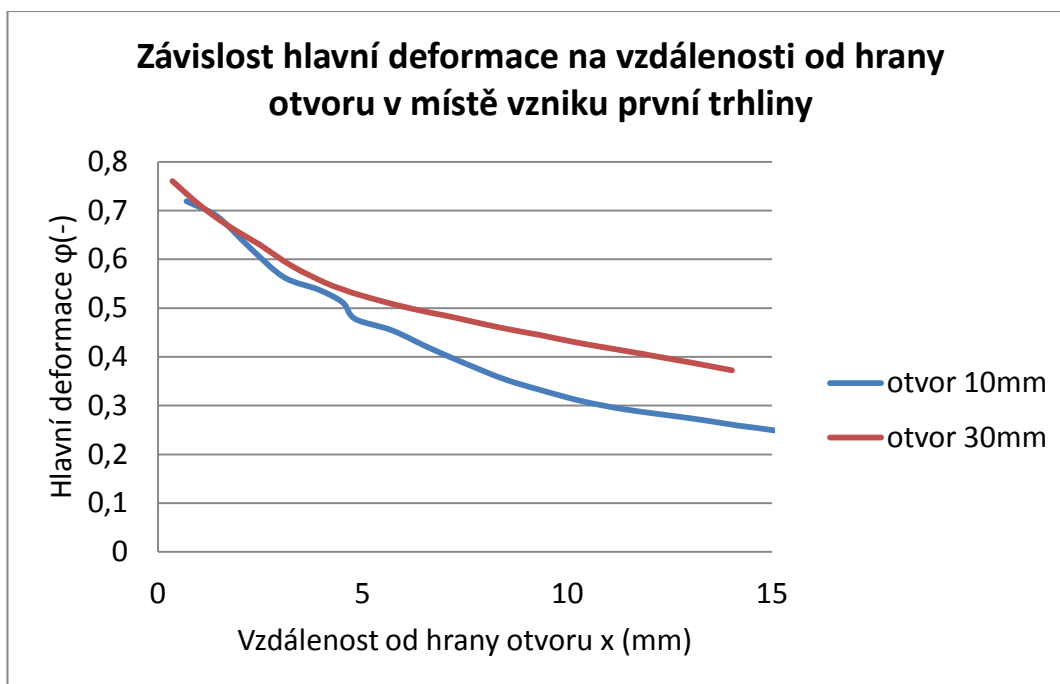
Po dodržení všech těchto kroků, systém Aramis vytvořil graf závislosti průběhu deformace na poloze od okraje rozšířeného otvoru (viz. Obr. 3.24).



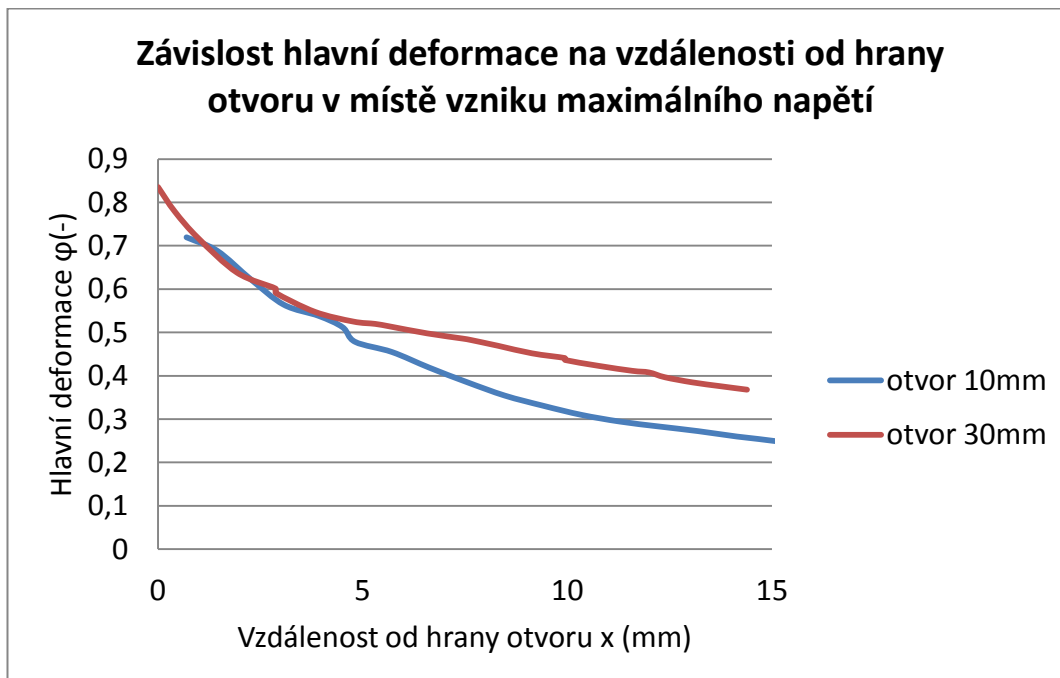
Obr. 3.24. Vygenerovaný graf závislosti deformace na poloze od okraje otvoru

Tento postup bylo nutné opakovat u každého vzorku. Tím bylo možné získat potřebné informace, pro vytvoření skupiny grafů porovnávající průběh vzniklé deformace pro průměry otvoru ve vzorcích 10mm a 30mm. Po získání potřebných grafů bylo potřeba pomocí programu Originpro 7.5 zprůměrovat grafy pro každou sadu vybraných vzorků. A to jak grafy odpovídající hodnotám v místě maximálního napětí (viz. Obr. 3.25), tak i v místě vzniku první trhliny (viz. Obr. 3.26). Vše pro to, aby bylo možné získat dvojici grafů, které byly využity pro vzájemné porovnání a

následnou možnost vyhodnocení, zda má průměr otvoru ve vzorku vliv na průběh gradientu deformace při zatěžování materiálu.



Obr. 3.25. Závislost deformace na vzdálenosti od hrany otvoru v místě vzniku první trhliny



Obr. 3.26. Závislost deformace na vzdálenosti od hrany otvoru v místě vzniku maximální deformace



4. Shrnutí výsledků a zhodnocení vlivu průměru otvoru na deformaci v materiálu

Během měření bylo zjištěno, že u otvoru o původním průměru 5mm nevznikne dostatečně velký deformační odpor pro rozšíření otvoru. Ten by musel být větší než odpor pro vypínání vzorku, aby došlo k jeho správnému porušení.

Při metodě Siebel a Pomp se pracovalo se vzorky s původními otvory průměru 10 mm až 30 mm. Při této metodě může dojít k určitým nepřesnostem. Tyto nepřesnosti jsou zapříčiněny dobou tažení po vzniku první trhliny. Jelikož bylo tažení ovládáno ručně, tak se nemusí povést přerušení namáhání hned při vzniku první trhliny. Proto se otvory mohou rozměrově lišit. Tyto rozdíly mezi vzorky se částečně eliminují při následném průměrování rozměrů rozšířených otvorů. Na základě vzorků byla vytvořena tabulka, ve které je znázorněno, jaké rozměrové změny nastanou v průměru otvoru při namáhání vzorku tažením. Z daných informací byly zjištěny potřebné hodnoty, které byly použity pro vytvoření grafu. Na něm je názorně vidět závislost deformace na průměru otvoru. Z naměřených hodnot a průběhu grafu lze vyvodit, že průměr původního obrobeného otvoru nemá vliv na deformaci na hraně otvoru.

Po vygenerování potřebných grafů pro vybrané vzorky a následném zprůměrování k sobě patřících průběhů daných vzorků, bylo možné vytvořit porovnávací grafy s průběhy pro původní otvory 10mm a 30mm. Jednalo se o porovnávací graf pro místo s maximální deformací a graf pro místo vzniku první trhliny. Při posuzování jednotlivých průběhů gradientů deformace v obou grafech, lze říci, že se deformace se změnou průměru otvoru chová jinak. Porovnáním grafů pro vzorky s počáteční hodnotou otvoru 10 mm a 30 mm, lze vypožorovat, že v případě otvoru 30 mm je průběh gradientu deformace pozvolnější, ale současně dosahuje vyšších hodnot oproti vzorku s otvorem 10 mm. Z toho vyplývá, že průměr otvoru při tažení má vliv na průběh deformace v okolí otvoru. Metodou vyhodnocování pomocí systému Aramis lze vypožorovat nevýhodu tohoto systému. Jelikož se jedná o optickou metodu pro vyhodnocování vzniklých deformací ve vzorcích, tak během výpočtů systému došlo ke vzniku prázdných míst. Tato místa nebylo možno vypočítat, z důvodu špatného načtení upraveného povrchu vzorku. Bylo by možné daná místa interpolovat, ale došlo by k zanesení dalších nepřesností



do výpočtu. Vzniklá výjimečná situace nebránila pokračovat v zjišťování průběhu deformace ve vzorcích.



5. Závěr

V bakalářské práci byl zkoumán vliv průměru obráběného otvoru na mezní deformaci v materiálu při zkoušce rozšiřování otvoru. Kriteriem pro ukončení testu byla mezní deformace v okamžiku vzniku viditelné trhliny na obvodu rozšiřovaného otvoru. Mezní deformace při zkoušce rozšiřováním byla zjišťována pomocí dvou metod. V prvním případě se jednalo o metodu měření průměru otvoru pomocí posuvného dílenského měřidla. V druhém případě pomocí optického bezkontaktního systému ARAMIS. Z naměřených výsledků je pro obě metody vyhodnocení patrné, že velikost rozšiřovaného otvoru nemá vliv na mezní deformaci rozšiřovaného otvoru. Porovnáním výsledků obou použitých metod, lze zjistit, že maximální deformace na hraně rozšířeného otvoru se moc neliší rozdíl je. Rozdíly mezi výsledky naměřenými oběma metodami jsou dány tím, že dochází k vyhodnocování zkoušky v jiný okamžik. Vzorky měřené posuvným měřidlem jsou zkoumány až po vzniku trhliny. Vzorky vyhodnocované systémem Aramis byly analyzovány na snímcích, které bezprostředně předcházejí vznik trhliny na hraně otvoru.

V případě sledování průběhu gradientu deformace je vidět u díry o průměru 30mm pozvolnější pokles křivky deformace a naměřené hodnoty mezní deformace jsou pro tento vzorek vyšší než u vzorku s průměrem otvoru 10mm. Gradient deformace ve směru kolmém na hranu rozšiřovaného otvoru je v tomto případě menší než u vzorků s menším poloměrem. Deformační analýza vzorků systémem Aramis je výhodnější než pomocí měření posuvným měřítkem, neboť optický systém zaznamenává celý průběh zkoušky až do okamžiku vzniku trhliny. Náročné na čas je ovšem vyhodnocení okamžiku vzniku trhliny avšak je možné celý záznam tváření vracet. Měřicí síť nanesená na povrch vzorku se již nadměrně porušuje a optický systém ztrácí schopnost měření. Další možné chyby se dopouštíme subjektivním ukončením testu, kdy je sledována vizuálně první trhlina na obvodu rozšiřovaného otvoru.

V případném pokračování řešení této problematiky, by bylo dobré se zaměřit na vzorky s jinými průměry otvorů a menšími rozdíly mezi nimi. Také by bylo vhodné vyzkoušet vzorky i z jiného materiálu, pro zjištění zda má materiál vliv na mezní deformaci. V neposlední řadě by bylo vhodné použít otvory nikoli obrobené, ale vystřižené, jelikož by to mohlo mít také vliv na průběh mezní deformace.



6. Seznam použité literatury

- [1] HLUCHÝ, M.; KOLOUCH, J.; PAŇÁK, R.; Strojírenská technologie 2: Polotovary a jejich technologičnost. Praha: Scientia, 2001, 316 s. ISBN 80-718-3244-8.
- [2] Konstrukce tvářecích nástrojů. Vysoká škola báňská [online]. 2004 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.345.vsb.cz/jirihruby/KTN/02_Materialy.pdf
- [3] Pevnostní materiály. Katedry strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci [online]. 2008 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf
- [4] Používání chemických látek při povrchových úpravách materiálů. Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci [online]. 2008 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: https://osha.europa.eu/fop/czechrepublic/cs/publications/files/Povrchove_upravy_CHL.pdf
- [5] HLUCHÝ, M. , KOLOUCH, J.; Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-7183-262-6.
- [6] Korozní odolnost Zn/Mg povlaků. In: Jabbim [online]. 2009 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: disk.jabbim.cz/sef@njs.netlab.cz/prezentace.pp
- [7] Zkoušení materiálů. Tepelné zpracování a slinování-cvičení [online]. 2006 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/material2.pdf>
- [8] Statické zkoušky: Zkouška tahem. Západočeská univerzita v Plzni [online]. 2006 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>
- [9] OCHMANOVÁ, M.; Strojní a technologická měření. Karviná, 2006.
- [10] Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy dle CSN ISO 148-1. In: Vysoká škola báňská [online]. 2011 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.fast.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fast/206/cs/okruhy/resene-projekty/frvs-2011-2894/zkouska-razem-v-ohybu-metodou-charpy.pdf>



- [11] Tvářitelnost kovů a nekonvenční metody tváření. Vysoká škola báňská [online]. 2009 [cit. 2013-05-11].
Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/TNMTV/PlosneTvareni.pdf>
- [12] Kapitoly z fotogrammetrie; Úvod. In: Střední průmyslová škola zeměměřická [online]. 2011 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://www.spszem.cz/images/stories/Dokumenty/Vyuka/FOT/1_vod.pdf
- [13] ARAMIS Software. *GOM Optical Measuring Techniques* [online]. 2012 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.gom.com/3d-software/aramis-software.html>
- [14] ARAMIS. *Delft University of Technology* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.io.tudelft.nl/?id=24420&L=1>
- [15] Generátor citace. *Citace* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://generator.citace.com/dok/LKVpfHkFbxByHemL>
- [16] Fyzikální základy vědy o materiálu. Masarykova univerzita [online]. 2005 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>
- [17] Technologie objemového tváření – válcování. Technická univerzita Liberec: Fakulta strojní [online]. 2006 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm
- [18] Galvanické pokovení. Galvanovna omega [online]. 1999 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.galvanovnaomega.cz/pokov/pokoveni.html>



Seznam obrázků

- Obr. 2.1. Různé způsoby strojního tváření za studena: a) válcování, b) kování, c) protahování, d) protlačování, e) hluboké tažení, f) vypínání materiálu, g) ohýbání.
- Obr. 2.2. Vzniklé deformace během válcování
- Obr. 2.3. Pokovování; anoda: plát kovu, kterým pokovujeme; Katoda: výrobek nebo výrobky, na kterých je nanášen povlak; Elektrolyt: většinou kyselá nebo alkalická lázeň, která umožňuje navázání a přenos kationů kovu, kterým pokovujeme.
- Obr. 2.4. Základní druhy namáhání materiálu
- Obr. 2.5. Trhací diagram
- Obr. 2.6. Charpyho kladivo
- Obr. 2.7. Ukázka tělísek a vtisků pro metody podle Brinella, Rockwella, Vickerse
- Obr. 2.8. Princip zkoušky podle Siebela a Pompa
- Obr. 2.9. Kamera a počítač vybaven systémem Aramis
- Obr. 2.10. Průběh simulace namáhání v systému Aramis
- Obr. 3.1. Přístřihy s vyhotovenými dírami
- Obr. 3. 2. Vzorek po nanesení bílé barvy
- Obr. 3. 3. Vzorek po nanesení černé barvy
- Obr. 3.4. Kalibrační destička
- Obr. 3.5. Kamery umístěné nad tažnicí
- Obr. 3.6. Upravený lis s kamerami
- Obr. 3.7. Zkušební přípravek s tažníkem
- Obr. 3.8. Prasklina na vzorku s otvorem o průměru 5mm



- Obr. 3.9. Trhlina na obvodu otvoru
- Obr. 3.10. Měření průměru rozšířeného otvoru
- Obr. 3.11. Graf závislosti deformace na průměru otvoru
- Obr. 3.12. Vzor vzniklý na povrchu vzorku, tzv. pattern
- Obr. 3.13. Obrazovka po načtení záznamu
- Obr. 3.14. Určení startovacího bodu
- Obr. 3.15. Vzorek na začátku namáhání
- Obr. 3.16. Vzorek na konci namáhání
- Obr. 3.17. Vzorek na začátku namáhání se znázorněným průběhem deformace
- Obr. 3.18. Vzorek na konci namáhání se znázorněným průběhem deformace
- Obr. 3.19. Průběh deformace na začátku namáhání
- Obr. 3.20. Průběh deformace na konci namáhání
- Obr. 3.21. Snímek před vznikem trhliny
- Obr. 3.22. Místo vzniku řezu
- Obr. 3.23. Plocha při zadávání řezu
- Obr. 3.24. Vygenerovaný graf závislosti deformace na poloze od okraje otvoru
- Obr. 3.25. Závislost deformace na vzdálenosti od hrany otvoru v místě vzniku první trhliny
- Obr. 3.26. Závislost deformace na vzdálenosti od hrany otvoru v místě vzniku maximální deformace



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24. 5. 2013

Podpis.....



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24. 5. 2013

Signature: